

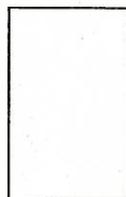
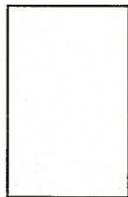
MÉTODO TAGUCHI: CASO DE APLICAÇÃO NA MELHORIA DO FABRICO DE ELÉCTRODOS PARA EDM

R. Domingues⁽¹⁾, L. Esperto⁽¹⁾, M. Santos⁽²⁾, A. Osório⁽²⁾

⁽¹⁾ Investigador Auxiliar ⁽²⁾ Investigador Principal

INETI/DMTP-UTP, Edificio C, Estrada do Paço do Lumiar, 1649-038 Lisboa

resina.domingues@ineti.pt; luis.esperto@ineti.pt; mario.santos@ineti.pt; antonio.osorio@ineti.pt



RESUMO

O Método de Taguchi, quando aplicado no desenvolvimento de produto, permite identificar as condições que conduzem ao desenvolvimento de produtos uniformes, com reduzida variação e dirigidos para um valor alvo específico. Foi aplicado o método ao estudo do fabrico de eléctrodos para EDM por meio de sinterização por Lazer (DMLS) de uma mistura de pó de aço "DirectSteel". O controlo do processo foi avaliado pela densidade obtida, variando-se os níveis dos factores de Potência, "Hatching" e Velocidade de Varrimento. Com um número reduzido de experiências foi possível identificar o factor que contribui significativamente para uma maior densificação das peças sintetizadas bem como os níveis dos factores de controlo.

ABSTRACT

The Taguchi Method, when used in product engineering, it allows the identification of the conditions, which lead to the development of similar products, with a small variation and applied to a particular goal value. This method was used by the electrodes production studies for EDM through a direct Laser sintering of a steel power mixture, named of "DirectSteel". The process control, varying the power factor levels "Hatching" and the scanning speed, it was evaluated by the obtained density. So, with a reduced number of experiments, it was possible to identify the factor and theirs levels, that most contributed to get better dense sintered parts.

1. MÉTODOS DE TAGUCHI

1.1. Introdução

Genichi Taguchi é um engenheiro Japonês que desenvolveu uma filosofia e uma metodologia para a melhoria contínua da qualidade. Só a partir de 1980 é que os seus métodos começaram a ser divulgados, nos Estados Unidos e noutros países ocidentais.

Os métodos tradicionais, ao avaliarem os custos da não qualidade, normalmente não consideram as perdas resultantes dos desvios das características dos produtos em relação ao valor nominal.

Deste modo, os artigos que se encontrem dentro dos limites e das tolerâncias previamente acordadas são considerados em conformidade, não se distinguindo dois.

lotes cujos valores das variáveis em análise, embora estejam dentro das especificações, tenham diferentes distribuições em relação ao valor nominal. Parte-se do princípio que o cliente fica satisfeito com o produto desde que ele obedeça às especificações [1].

Para Taguchi, a perda de qualidade começa a partir do momento em que o valor da variável em análise se afasta do valor nominal.

Desta forma, a qualidade de um produto deve ser avaliada pelo desvio das suas características em relação ao valor nominal, devendo, nesse caso, os artigos do mesmo lote apresentar uma variação mínima relativamente ao valor nominal da variável de controlo.

O desvio do valor nominal de uma determinada característica introduz uma determinada perda económica, perda essa que envolve todo o ciclo de vida do produto, suportada pelos fabricantes durante a fase de fabrico, e pelos consumidores durante a sua utilização.

A estratégia a seguir no desenvolvimento de um produto deverá ser no sentido de se obterem produtos uniformes, com reduzida variação e dirigidos para um valor alvo específico.

1.2. Economia da redução da variação

Relacionado com o conceito de qualidade do produto, Taguchi introduziu o conceito de Função de Perda, identificado por $L(y)$ (Eq. 1), que reflecte em valor monetário, a variação da característica em análise y em relação ao seu valor nominal m , sendo nula, quando $(y=m)$.

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad \text{Eq. 1[2]}$$

com

$$k = A_0/\Delta_0^2 \quad \text{Eq. 2[2]}$$

em que A_0 é o custo médio de reparação do produto quando y excede os limites $(y_0 \pm \Delta_0)$. A Função de Perda apresenta as seguintes características (Fig.1):

- É nula quando o valor da característica avaliada coincide com o valor nominal.

- Aumenta exponencialmente quando o valor da característica se afasta do valor nominal.

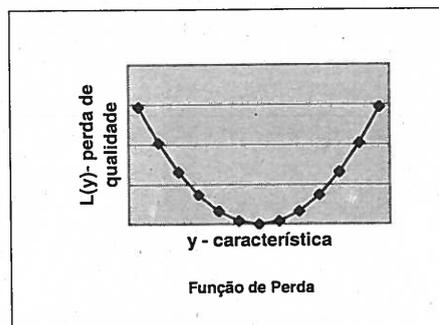


Fig. 1 Variação da Função de Perda

Para um número n de produtos, a perda média por produto será dada por:

$$L = k (\text{MSD}) \quad \text{Eq. 3[3]}$$

sendo **MSD** o desvio quadrático médio e como valor estatístico mede também a variação da característica em análise do valor nominal.

A função de perda pode ser aplicada às diferentes características de qualidade do produto, considerando determinadas premissas como condição limite de avaliação:

- nominal melhor
 - o maior melhor
 - menor melhor

Condição: Nominal Melhor

$$\text{MSD} = (y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots + (y_n - m)^2 / n \quad \text{Eq. 4[3]}$$

Condição: Maior Melhor

$$\text{MSD} = (1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_n^2) / n \quad \text{Eq. 5 [3]}$$

Condição: Menor Melhor

$$\text{MSD} = (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) / n \quad \text{Eq. 6[3]}$$

Em termos práticos o conceito de função de perda apresenta duas aplicações práticas:

- Permite estimar quais as economias conseguidas no desenvolvimento de um produto devidas à diminuição da variação da característica a controlar

- Permite definir as tolerâncias aceitáveis para o produto de acordo com as exigências do mercado.

1.3. Desenho de experiências

O Desenho ou Planeamento de Experiências é uma técnica estatística, que tem por objectivo a melhoria da qualidade dos produtos e processos pois permite determinar quais os factores que afectam determinadas características do produto e quais os melhores níveis desses factores.

No desenho mais simples, comparam-se os efeitos de vários níveis de um factor numa ou mais características do produto. Este planeamento “um factor de cada vez”, onde um factor varia enquanto os outros se mantêm fixos, exige um maior número de experiências, que os outros planeamentos e não permite detectar as possíveis interacções entre factores.

O Planeamento Factorial Completo estuda o efeito de todas as combinações possíveis entre os níveis dos vários factores considerados.

Considerando um planeamento factorial onde F é o número de níveis por factor, n é o número de factores, o número de experiências necessárias N para se estudarem todas as combinações será dada pela seguinte expressão,

$$N = F^n \quad \text{Eq. 7 [3]}$$

Esta relação aumenta rapidamente à medida que o número de factores aumenta, fazendo com que em muitas situações o tempo e os custos associados à realização das experiências inviabilize a sua aplicação.

O Factorial Completo é a base para a construção do Planeamento Factorial Fraccionado, onde, com um número reduzido de experiências, é possível obter a informação relevante obtida num planeamento factorial completo.

1.4. Matrizes Ortogonais

As chamadas Matrizes Ortogonais (*orthogonal arrays*) definidas por Taguchi, correspondem a matrizes fraccionadas, mas

normalizadas de acordo com o número de factores e dos níveis por factor.

A representação habitual das matrizes desenvolvidas por Taguchi é do tipo L_n , onde n representa o número de experiências a efectuar, sendo exemplo a matriz do tipo L_8 (Tabela 1) [4].

Se à matriz L_n correspondem $n-1$ graus de liberdade, no caso da matriz L_8 correspondem 7 graus de liberdade, permitindo o estudo de 7 factores controláveis, cada um com dois níveis.

Tabela 1: Matriz L_8 de Taguchi [4].

Experiência N.º	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

A escolha adequada da matriz de Taguchi faz-se a partir do número de factores a controlar e dos níveis por factor.

Os factores não controláveis, também designados por factores de ruído, são incluídos numa segunda matriz (matriz exterior) utilizada em conjunto com a primeira (matriz interior).

As matrizes apresentadas na literatura [5] cobrem a maioria das experiências desde que os factores controláveis apresentem os mesmos níveis 2, 3 ou 4 e a interacção entre os factores seja desprezável. Quando tal não acontece há que utilizar as chamadas matrizes modificadas de modo a contemplar as particularidades próprias do problema em análise.

A matriz mais simples definida por Taguchi é a L_4 para o estudo de três factores A, B e C, com dois níveis cada (Tabela 2).

A matriz L_4 caracteriza as condições em que se deverão realizar as experiências, em que os factores a controlar estão afectos às colunas da matriz e, para cada experiência são indicados os níveis 1 e 2.

Tabela 2: Matriz L_4 de Taguchi [4].

Experiência N.º	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

No desenho de experiências com 4, 5, 6 ou 7 factores com 2 níveis em cada factor utiliza-se sempre uma matriz do tipo L_8 .

Na utilização de aplicações em que se exija a afectação de três níveis por factor, desenvolvem-se matrizes ortogonais do tipo L_9 (Tabela 3).

Tabela 3: Matriz L_9 de Taguchi [4].

Experiência N.º	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

1.5 Análise dos resultados

A Análise de Variância (ANOVA) efectuada aos resultados das experiências permite identificar quais os factores que apresentam maior contribuição para reduzir a variação e ao mesmo tempo ajustar a média da variável a controlar, e qual a contribuição, em percentagem, de cada um desses factores. Permite ainda identificar qual o efeito dos factores, isto é, quais os melhores níveis dos factores de controlo que conduzem às melhores características de qualidade do produto.

A contribuição dos factores de controlo bem como o efeito dos valores podem ser calculados a partir do valor médio das (N) experiências ou a partir do índice Sinal Ruído (S/N). Este índice proposto por Taguchi, é uma medida da variação, cuja maximização em geral minimiza a função de perda.

$$S/N = -10 \log (\text{MSD}) \quad \text{Eq. 8 [2]}$$

A partir do cálculo do desvio (MSD) e pela aplicação da função de perda $L = k(\text{MSD})$ é possível calcular os ganhos obtidos pela escolha dos melhores níveis dos factores.

Taguchi sugere que sejam feitas experiências confirmatórias utilizando-se os melhores níveis dos factores controláveis e comparando estes valores com o valor esperado ou previsto para a média ou para a variação.

1.6 Condução das experiências

A implementação dos métodos Taguchi deverá realizar-se de acordo com a seguinte metodologia [3]:

- "brainstorming;
- planeamento de experiências;
- realização das experiências;
- análise dos resultados ;
- realização de experiências de validação.

A etapa da discussão reveste-se de grande importância dado que se procura identificar as características de qualidade a ter em conta no desenvolvimento do produto, qual o valor desejado para a características a controlar (nominal, maior ou menor melhor), bem como os ensaios a realizar na avaliação dessas características.

Deverão também ser identificados os factores de controlo e de ruído, os níveis por factor, e a possível interacção entre eles. A escolha da matriz adequada resulta da resposta a estas questões.

As experiências de validação correspondem à realização de ensaios confirmatórias utilizando os melhores níveis dos factores e comparando com o valor esperado ou previsto.

2. CASO DE ESTUDO

2.1. Objectivo

A aplicação desenvolvida teve por objectivo a identificação das melhores condições de sinterização de uma mistura de pós metálicos por meio de *DMLS* -

sinterização directa de metais por laser, que garantissem uma boa densificação do material em aço do tipo "DirectSteel" para o fabrico rápido de eléctrodos para EDM-maquinação por electroerosão de penetração.

2.2. "Brainstorming" do processo

Os factores que controlam o processo e que foram os elementos de discussão são a Potência do Laser, o "Hatching" (distância entre varrimentos) e a Velocidade de Varrimento do Laser

Sendo o objectivo experimental do processo de DMLS, a obtenção de um eléctrodo com a máximo densificação, procurou-se definir os parâmetros da máquina, de modo a poder obter-se esse eléctrodo.

Assim, para o estabelecimento do Método Taguchi, foram identificados os parâmetros da máquina (factores) e os seus níveis:

- a Potência, que se identificou como o **Factor A**, é definida em percentagem da potência real do Laser, varia entre 65 e 95%;
- o "Hatching", que se identificou como o **Factor B**, varia entre 0.24 e 0.36 mm;
- a Velocidade de Varrimento que se identificou como o **Factor C**, varia entre 100 e 500 mm/s.

Seleccionaram-se para cada um dos factores, três níveis considerando sempre um valor mínimo, um máximo e um intermédio (Tabela 4).

Tabela 4: Factores e níveis.

NÍVEL	FACTORES		
	A	B	C
	Potência do Laser (%)	"Hatching" (mm)	Velocidade (mm/s)
1	65	0.24	100
2	80	0.30	300
3	95	0.36	500

2.3. Planeamento das experiências

Da análise acima realizada, com 3 níveis e três factores, num planeamento factorial completo, necessitaria de 27 experiências.

Para o planeamento foi escolhida uma matriz L_9 , que permitiu o estudo de quatro factores com três níveis cada. Trata-se de uma matriz não saturada, tendo-se utilizado a quarta coluna como estimativa do erro.

Em cada experiência realizaram-se dois ensaios e, calcularam-se os valores da densidade do material sinterizado e do índice de sinal ruído S/N para cada experiência (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados da densidade e S/N.

Experiência N.º	Factores				Densidade		S/N
	A	B	C	e	1	2	
1	1	1	1	1	7.48	7.37	17.41
2	1	2	2	2	6.36	6.44	16.12
3	1	3	3	3	5.59	5.60	14.96
4	2	1	2	3	6.61	6.65	16.43
5	2	2	3	1	6.12	6.03	15.67
6	2	3	1	2	7.66	7.55	17.62
7	3	1	3	2	6.30	6.25	15.95
8	3	2	1	3	7.70	7.72	17.74
9	3	3	2	1	6.21	6.07	15.76

2.4. Análise Estatística (ANOVA)

A avaliação dos resultados pelo método da Análise de Variância (ANOVA) calculada a partir do índice Sinal Ruído S/N indicou, que a Velocidade de Varrimento é o factor mais relevante para o desempenho do processo, com uma contribuição de cerca de 88%, considerando no estudo os três factores do processo e os três níveis para cada factor (Tabela 6).

O efeito dos factores, calculados respectivamente a partir dos valores médios da densidade (Tabela 7) e a partir dos valores do índice sinal ruído S/N (Tabela 8), podem ser observados e avaliados graficamente (Figs. 2 e 3, respectivamente).

Da avaliação dos resultados, a melhor combinação a ser usada na experiência confirmatória deverá ser:

$$A_2, B_1, C_1$$

Estes níveis dos factores controláveis diminuem a variação e servem para ajustar a média.

Tabela 6: Análise de variância (ANOVA).

Origem	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados (Variação)	Variância	F-Teste	Contribuição (%)
	(f)	(S)	(V)	(F)	(P)
(A) Potência	2	0.279	0.139	2.22	2.01
(B) Hatching	2	0.402	0.201	3.21	3.63
(C) Veloc.	2	6.813	3.407	54.34 (*)	87.78
(e) Erro exp.	2	0.125	0.063		6.58
Total	8	7.620			100

(*) pelo menos 97.5 %

Tabela 7: Efeito dos factores na densidade.

NÍVEIS	FACTORES		
	A	B	C
Nível 1	6.47	6.78	7.58
Nível 2	6.77	6.73	6.39
Nível 3	6.71	6.45	5.98

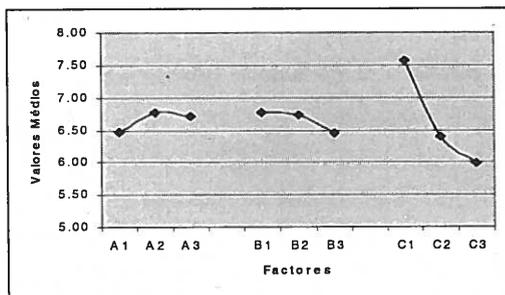


Fig. 2: Variação factor vs densidade média.

Contudo, porque o efeito dos factores A e B no processo é pouco significativo deverá utilizar-se correntemente, por questões económicas, os níveis:

A₁, B₃, C₁

Isto fica a dever-se ao facto de se utilizar uma potência mais baixa, reduzindo o custo de energia; ao mesmo tempo selecciona-se uma distância entre varrimentos mais alargada, correspondendo a um menor tempo da sinterização.

O valor esperado ou previsto para a variação medido pelo índice sinal – ruído S/N será de,

$$17.95 \pm 1.38$$

Tabela 8: Efeito dos factores com o S/N.

NÍVEIS	FACTORES		
	A	B	C
Nível 1	16.16	16.60	17.59
Nível 2	16.57	16.51	16.10
Nível 3	16.48	16.11	15.53

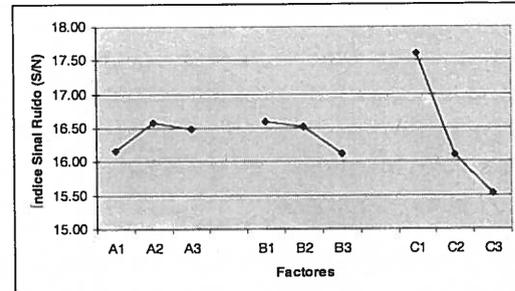


Fig. 3: Variação factor vs com o S/N.

2.5. Discussão

O método Taguchi, quando aplicado na fase de desenvolvimento do produto permite identificar, com um número reduzido de experiências, os factores de controlo e os seus níveis, que conduzem às melhores características de qualidade do produto, bem como a contribuição de cada um desses factores.

Os resultados obtidos deste estudo indicam que, os níveis dos factores **A₂**, **B₁** e **C₁** são os que contribuem simultaneamente para ajustar a média (*maior densidade melhor*) e para diminuir a variação. Dado que o efeito dos factores “hatching” e potência, são pouco significativos, deverá escolher-se, por razões económicas, um “hatching” de 0.36 mm e uma potência do laser de 65 % para uma velocidade do laser de 100 mm/s.

A aplicação apresentada destinada à produção de eléctrodos pelo processo de sinterização directa por laser de metais e à avaliação dos parâmetros mais influentes no seu fabrico, cujos parâmetros não são comparáveis com os utilizados com os processos convencionais, como não se têm dados de produção, que confirmem esta análise.

3. CONCLUSÕES

Como uma conclusão da aplicação do Método Taguchi ao processo de fabrico de

elctrodos rápidos por DMLS, poder-se-á dizer que o factor velocidade contribui simultaneamente para diminuir a variação e ajustar a média.

Como conclusões finais da avaliação do desempenho do processo DMLS sobre uma mistura de pós de aço "DirectSteel" poder-se-iam registar:

- A velocidade é o único factor que contribui significativamente para a obtenção do maior valor de densificação, com cerca de 88%, com um grau de confiança de pelo menos de 97.5%.
- A contribuição dos outros dois factores, "hatching" e velocidade de varrimento, foi de aproximadamente de 6 %.
- Os valores obtidos pela análise de variância apresentam um erro experimental relativamente pequeno, inferior a 7%, valor que corresponde à não identificação das causas da variação da densidade.
- Os factores/níveis que conduzem ao melhor resultado são: **A₂, B₁, C₁**.
- A realização da experiência confirmatória deverá ser realizada com os factores/níveis: **A₂, B₁, C₁**.

- Normalmente, por questões económicas deverão escolher-se os factores/níveis: **A₁, B₃, C₁**.

REFERÊNCIAS

- [1] Pereira, Zulema L., *Planeamento e Controlo de Qualidade*, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1997/1998.
- [2] *Taguchi Methods-Introduction to Quality Engineering*, American Supplier Institute, Inc, 1989.
- [3] Roy, Ranjit, *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [4] Ross, Phillip J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering. Loss Function, Ortogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*, McGraw – Hill, Inc., 1988
- [5] Yuin WU. 1986. Orthogonal Arrays and Linear Graps. Dearborn, Michigan, American Supplier Institute.

